

Paper 35 – Optimización del Lay-Out del Puerto de Aguas Profundas, República Oriental del Uruguay

Julio Cardini, Sandra Acuña y Gimena Reguero
Serman & asociados S.A.

Email: cardini@serman.com.ar

ABSTRACT: El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) de la República Oriental del Uruguay contrató al Grupo Consultor CSI Ingenieros y Serman & Asociados S.A. para realizar los estudios de ingeniería necesarios para definir a nivel básico las obras portuarias del Puerto de Aguas Profundas (PAP) y alcanzar una estimación inicial de las inversiones requeridas.

El punto de partida del Proyecto Básico fue una configuración portuaria preliminar y estudios básicos de campo brindados por el MTOP, los cuales fueron analizados a la luz del clima de olas de la zona de implantación, a los efectos de optimizar la disposición del Lay-out de los componentes del puerto.

Se realizaron estudios de clima marítimo y agitación mediante modelización matemática, para la definición de la orientación de la boca de acceso del puerto, disposición de las obras de abrigo y de los sitios de atraque.

En primer lugar se implementó el modelo matemático STWAVE (STeady State Spectral WAVE) del Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, a los efectos de calcular la generación y transformación de olas desde aguas profundas hasta el sitio de implantación del puerto. El mismo utilizó como parámetros de entrada la información de vientos y olas cada 3 horas obtenida del modelo global Wavewatch III de la NOAA. Los resultados de la modelación realizada fueron validados mediante comparación con datos de olas registrados en inmediaciones del área portuaria por medio de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), considerando la componente más energética del oleaje en cada evento.

Se realizó un análisis estadístico direccional del oleaje, y en base al mismo y aplicando el Modelo BOUSS-2D, basado en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq deducidas por Nwogu, se analizaron distintas configuraciones de la ubicación y disposición de las obras de abrigo y sitios de atraque con el objeto de determinar la más conveniente en relación a la agitación en los sitios de atraque. El modelo simula el efecto combinado de refracción/difracción/reflexión del oleaje, pudiendo considerar cuando corresponde, efectos de disipación por fricción y rotura de la ola.

Para efectuar el ajuste del Lay-out se estimó en los sitios de atraque el número de horas anuales de superación de alturas significativas de ola iguales a 0,8 m y 0,5 m para los buques Graneleros y Mineraleros, y para los buques de Carga General, respectivamente

Se estudiaron configuraciones de obras de abrigo exentas, comunicadas con la costa mediante un viaducto transparente a las corrientes y el oleaje.

La modelación matemática fue empleada para seleccionar una configuración portuaria para la cual la duración de condiciones de oleaje en los sitios de atraque, superiores a los límites indicados, resultara significativamente inferior a la máxima admisible adoptada, igual a 200 horas anuales.

1 INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO) de la República Oriental del Uruguay, con el propósito de constituir un nodo concentrador de cargas (hub) para los flujos comerciales de graneles secos, hidrocarburos y contenedores soportados por el transporte por agua, impulsó la construcción de un Puerto de Aguas Profundas (PAP) en la costa este del país sobre el Océano Atlántico en el paraje El Palenque ubicado en el departamento de Rocha.

En este marco se realizaron estudios de clima marítimo y agitación, mediante modelación matemática, con el objeto de optimizar la configuración portuaria preliminar brindada por el MTO.

El clima de olas frente a la boca del nuevo puerto se ha obtenido mediante la implementación de un modelo de propagación y generación del oleaje, partiendo de un punto exterior de la grilla de datos cada 3 horas del modelo global Wavewatch III de la NOAA, e imponiendo los vientos obtenidos del mismo modelo como condiciones forzantes.

Los resultados de la modelación realizada han sido validados mediante comparación con datos de olas registrados en inmediaciones del área portuaria por medio de un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

Posteriormente se desarrolló el estudio de agitación en el interior portuario mediante la implementación de un modelo numérico que resuelve los procesos de difracción, refracción, bajío y reflexión, para la configuración final portuaria.

Finalmente las alturas de olas significativas en las futuras zonas de atraque fueron calculadas a partir del clima de olas, previamente computado frente a la boca del nuevo puerto.

Se presentan los resultados de la modelación con el correspondiente análisis de operatividad portuaria.

2 ESTUDIO DE OLEAJE INCIDENTE

2.1 Clima de olas registrado mediante ADCP

Se presenta la caracterización del clima de olas frente al área portuaria, en función de los datos registrados con ADCP durante el período 29/10/2013 al 13/4/2014.

El análisis de datos del ADCP muestra que el oleaje en la zona es en general multimodal, siendo frecuente la ocurrencia de condiciones

en las que dos mares de fondo (swell) provenientes del E y S conviven con el mar de viento (sea) (Figura 1). Esta configuración es recurrente (IMFIA, jun'14), por este motivo el procedimiento básico de cálculo de una única altura de ola significativa a partir del espectro direccional, que se le asocia un período y dirección obtenidos a partir del máximo (pico) del espectro omnidireccional, puede ser insuficiente.

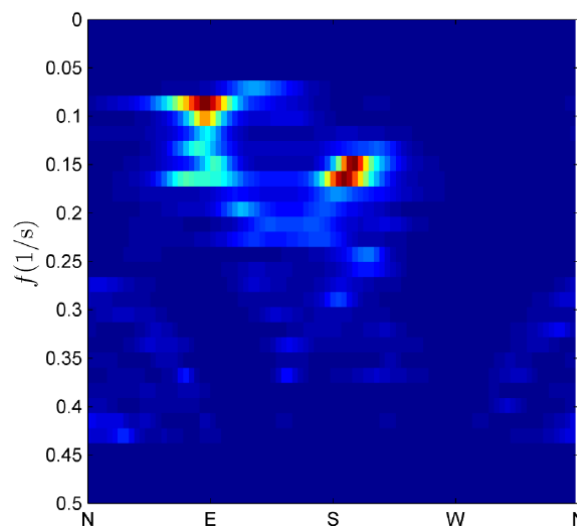


Figura 1: Ejemplo de un espectro direccional registrado, mostrando la coexistencia de swell y sea del E y swell del SSO. Fuente: IMFIA (jun'14)

En el espectro promedio para el período de medición informado (ver Figura 2) se observa la existencia de dos picos bien claros correspondientes a swells provenientes del E y del SSE. Se ve además que desde la dirección NW prácticamente no llega nada.

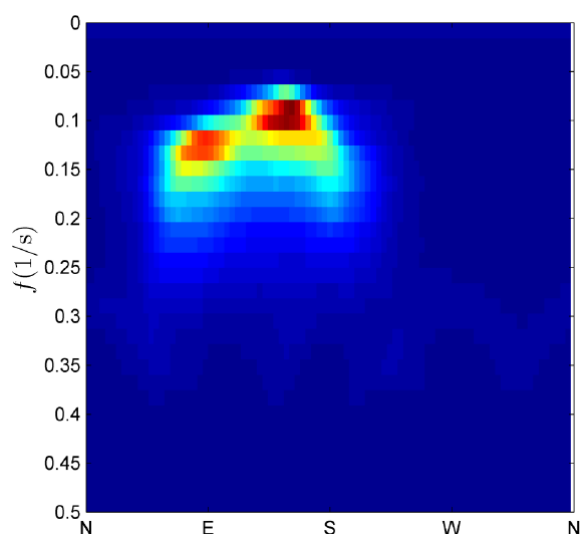


Figura 2: Espectro promedio para el período de medición. Fuente: IMFIA (jun'14)

Se realizó un análisis estadístico de la distribución de alturas y períodos de pico considerando la dirección más energética de cada registro (Figura 3 y Figura 4), el cual muestra la predominancia de oleaje del ENE / Este y del SE / SSE / Sur, en desmedro de las direcciones intermedias.

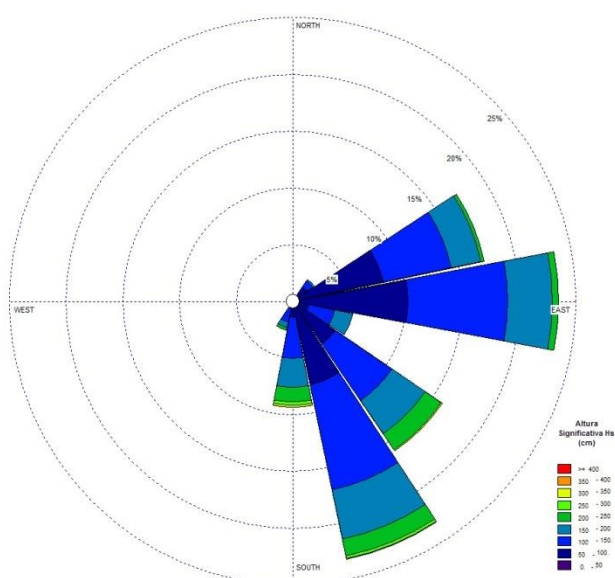


Figura 3: Distribución direccional de altura de ola registrada mediante ADCP, clasificada según la dirección más energética.

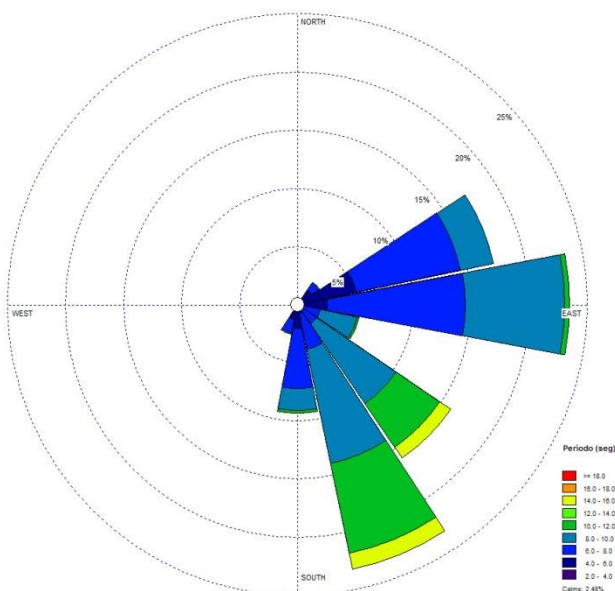


Figura 4 Distribución direccional del período de pico de ola registrado mediante ADCP, clasificado según la dirección más energética (se considera calma el oleaje de baja intensidad con períodos menores a 2 seg).

2.2 Modelación matemática del clima de olas

El clima de olas frente a la boca del nuevo puerto se ha obtenido mediante la implementación del modelo STWave (STeady State Spectral WAVE) de propagación y generación de olas a partir de datos de vientos y olas oceánicas, generados por el modelo global Wavewatch III del NOAA. Los datos empleados surgen de la base de datos cada 30 segundos de latitud y longitud, de 9 años de duración, desde febrero de 2005 a enero de 2014. Los puntos de extracción de datos se ubican al Sur y Este, respectivamente (ver Figura 5), habiéndose seleccionado cada dato de una u otra serie, según la dirección de incidencia.

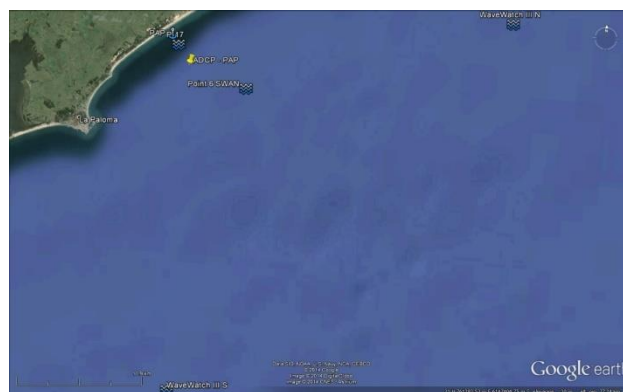


Figura 5: Ubicación de los puntos Wavewatch ubicados hacia el Norte y Sur de la Zona del PAP.

La distribución direccional de olas muestra la existencia de dos direcciones predominantes (ENE / E y SSE / S), de manera similar a lo registrado mediante ADCP en las inmediaciones del área portuaria.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO STWAVE

El modelo STWAVE desarrollado por el Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center, es un programa robusto y muy flexible que permite simular el crecimiento, propagación y transformación de olas sobre la costa, incluyendo los efectos de bajío, refracción por profundidad y por corrientes, difracción, crecimiento y rotura por efecto de la profundidad, interacción entre ola y ola y rotura, redistribución y disipación de la energía para un campo de olas en crecimiento.

Como resultado de la aplicación del modelo es posible determinar las características (altura, período y dirección) de las olas transformadas

por los efectos mencionados para cada uno de los puntos de grilla.

El modelo opera sobre espectros de energía de ola, o sea que representa la distribución del oleaje tanto en frecuencia como en dirección, alrededor de la dirección dominante y el período de pico del espectro. Se pueden considerar espectros de energía más o menos amplios en función de las características de las olas incidentes (más estrechos en el caso de las olas oceánicas de largo período que en las olas de período más corto generadas por vientos locales).

Los procesos de transformación de olas son muy sensibles al período de las mismas, por lo cual la distribución de la energía según la frecuencia provee de información muy valiosa en ciertas circunstancias. Los parámetros principales que se obtienen en el análisis espectral son la altura H_{mo} , que normalmente corresponde a la altura significativa H_s , y el período de pico T_p , que se puede relacionar con el período significativo.

El modelo STWAVE considera en forma automática un espectro de energía a través de la aplicación de parámetros de forma del mismo, los cuales son recomendados en la bibliografía en función de los períodos de ola.

Un espectro de energía es una representación estadística del campo de olas y se obtiene por superposición lineal de ondas monocromáticas. Por su parte la superficie del mar puede ser considerada como una sumatoria de infinitas ondas monocromáticas:

$$S(t) = \sum_1^{\infty} a^n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f^n \cdot t + \varepsilon^n)$$

en la cual un diferencial de frecuencia df contiene infinitas f^n , y ε^n es una fase aleatoria entre 0 y 2π .

a^n es infinitesimal, pero $\sum_f^{f+df} (a^n)^2 / 2 = S(f) df$

donde $S(f)$ = densidad espectral de energía (en long^2 / t) y la energía media por unidad de superficie es:

$$E = \rho \cdot g \cdot \int_0^{\infty} S(f) \cdot df = \rho \cdot g \cdot m_o$$

donde m_o es el momento cero o área bajo la curva de densidad de energía, y se relaciona con la altura de la ola significativa:

$$H_s(1/3) \approx 4 \sqrt{m_o}$$

En la Figura 6 se puede apreciar la diferencia entre el espectro de energía en la zona de generación (olas locales - sea) y fuera de la misma (olas oceánicas - swell).

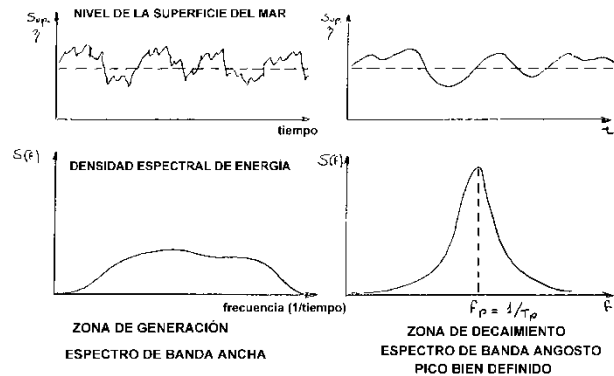


Figura 6: Espectros de energía típicos en un área de generación (olas locales – sea) y fuera de la misma (olas oceánicas – swell).

Para cada simulación espectral se propagan olas con 30 intervalos de frecuencia y 72 intervalos direccionales. La altura significativa es igual a 4 veces la raíz cuadrada del área bajo el espectro de energía.

Adicionalmente a la propagación de las olas hasta la costa, el modelo STWAVE permite la generación y transformación de olas locales a partir de los vientos actuantes sobre el área.

IMPLEMENTACIÓN DEL STWAVE

Para la implementación del modelo se generó una grilla de profundidades basada en relevamientos de la zona de implantación del puerto y canal de acceso entregados por el Comitente. Fuera de las áreas cubiertas por dichos relevamientos se utilizó la información batimétrica de la carta batimétrica global GEBCO (GEneral Bathymetric Chart of the Oceans). Ver Figura 7.

La grilla del modelo STWAVE implementado tiene 72 km de ancho (en dirección paralela a la costa) y 39 km de largo (en dirección perpendicular a la costa), con un tamaño de celda de 200 x 200 m (70.200 elementos).

El borde oceánico del modelo, en aguas profundas, se ubicó a una distancia del PAP tal de abarcar la posición de los datos de olas provistos por el modelo Wavewatch III del NOAA mencionado en el Parágrafo 3.1.

La serie de datos (cada 3 horas) de dirección y altura de ola y de dirección y altura del viento, disponibles para dicho modelo global (1/2/2005 - 31/1/2014), fueron impuestos como condición de borde del modelo STWAVE implementado. Por lo tanto el oleaje que ingresa al modelo local, además de sufrir efectos de refracción y bajío (shoaling) a lo largo de su propagación hacia la costa, está influenciado por el campo de vientos actuante sobre el área (los datos de vientos, así como los del oleaje que constituyen

la condición de borde, corresponden a un punto que se encuentra a unos 35 km de la boca proyectada del nuevo puerto y, a falta de otra información disponible para el período de modelación, se los ha considerado representativos del área bajo estudio a los efectos de la transformación del oleaje). De esta manera, el modelo STWAVE es capaz de suministrar energía adicional al oleaje en el caso de que el mismo no haya alcanzado su máximo desarrollo en la localización del borde del modelo.

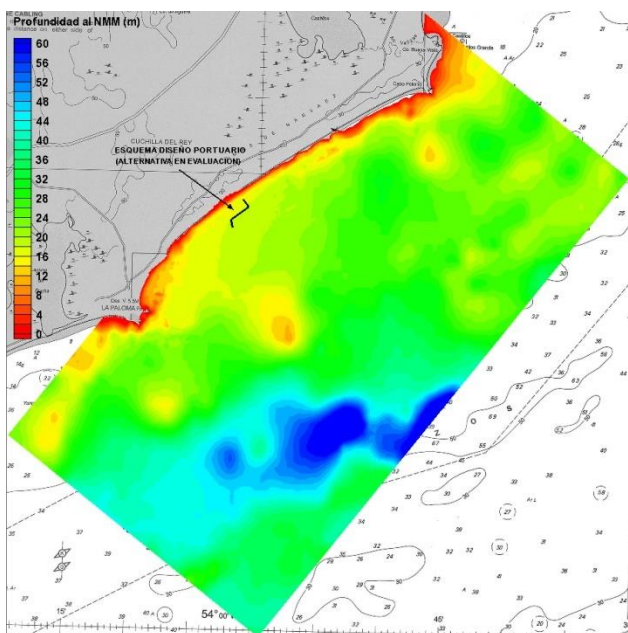


Figura 7: Batimetría correspondiente al modelo STWAVE implementado.

Como resultado del modelo implementado se obtienen los valores de dirección, altura y período de ola en todo el dominio de cálculo, lo que permite generar estadísticas del clima de olas en el área ubicada frente a la boca portuaria.

A continuación se ilustra, a modo de ejemplo, el campo de olas resultante frente el área del futuro puerto para distintas direcciones de oleaje incidentes (Figura 8, Figura 9 y Figura 10). El punto denominado B1S, representado en las figuras, es en donde se elaboró una serie de datos de oleaje modelados (ver parágrafo 2.4) y se ubica frente a la boca del nuevo puerto, orientada en dirección Sur de acuerdo a una de las alternativas de diseño evaluadas. Se seleccionó el mismo por ser representativo del oleaje incidente que será empleado para el estudio de agitación interior.

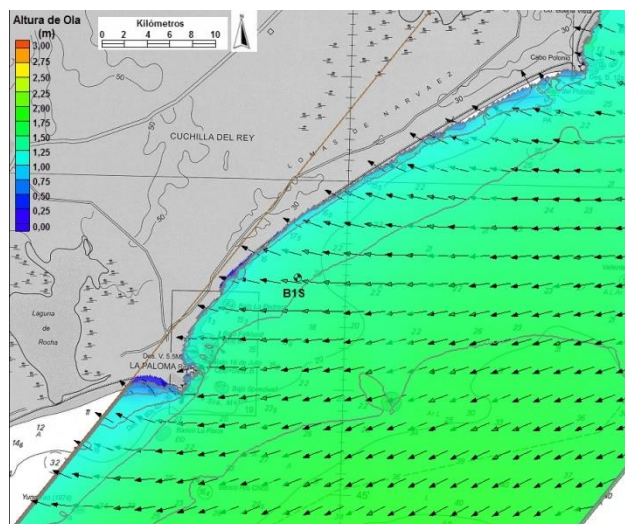


Figura 8: Ejemplo de modelación de olas del ENE.

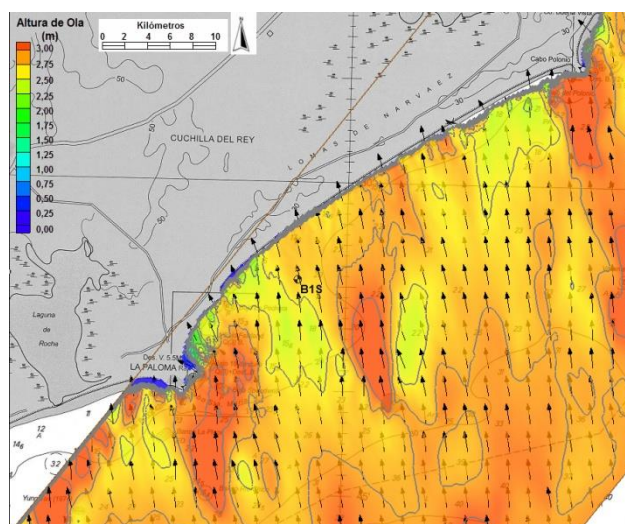


Figura 9: Ejemplo de modelación de olas del Sur-SSE.

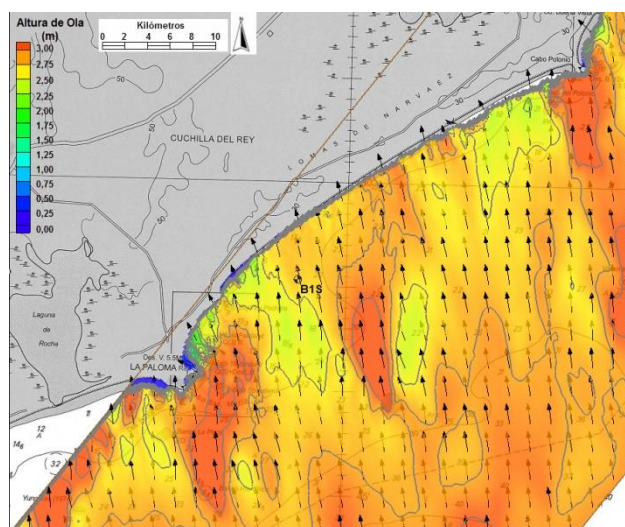


Figura 10: Ejemplo de modelación de olas del SSO-SO.

2.3 Comparación entre el clima de olas modelado y el registrado mediante ADCP

La serie de tiempo de los resultados del modelo STWAVE, comparados con las mediciones realizadas mediante ADCP, se presenta a continuación (Figura 11, Figura 12 y Figura 13). Asimismo, en la Figura 14 se muestra la comparación de los respectivos histogramas de altura de ola.

De la observación de la serie temporal de resultados se desprende que las alturas y direcciones de ola arrojadas por el modelo representan aceptablemente aquellas registradas mediante ADCP.

Al respecto cabe mencionar que la dirección del oleaje obtenida con el modelo STWAVE, resultante de haber impuesto como condición de borde los datos del modelo global Wavewatch III del NOAA, representa la componente más energética de las olas. De esta manera, la comparación de los resultados obtenidos se realiza tomando, también, la dirección más energética del oleaje registrado con ADCP.

Por otro lado, de la observación de la Figura 14 se desprende que:

- La frecuencia de ocurrencia de las olas más bajas (de hasta 1 m) resulta menor para la serie modelada que para aquella registrada.
- La frecuencia de ocurrencia de las olas más altas (de más de 1,5 m) es mayor para la serie modelada que para aquella registrada (esta diferencia no es significativa para alturas mayores a 2,5 m).

Por último, el valor medio de altura significativa de ola arrojado por el modelo para todo el período de comparación con los datos del ADCP (13/11/2013 – 31/1/2014) es de 1,3 m, un 8% superior al registrado (1,2 m). De esta manera, si bien el período de comparación es demasiado corto como para establecer conclusiones estadísticas y, además los datos del ADCP poseen un rango de incertidumbre intrínseco (tal como puede observarse en el informe del IMFIA), se puede concluir que la agitación media frente al área de la futura boca portuaria resultante de la aplicación del modelo podría ser ligeramente superior a aquella registrada, resultando entonces levemente conservativa. En cuanto a los períodos medios de ola, el medio arrojado por el modelo es de 7,7 seg y el registrado 8,1 seg. (5% superior), lo cual a los efectos prácticos muestra un muy buen ajuste entre la modelación y el registro.

Estas diferencias encontradas resultan pequeñas si se tiene en cuenta el distinto origen de los datos que se comparan (registrados con ADCP y calculados por modelación a partir de datos de olas oceánicas cuyas alturas y períodos se estiman a partir de altimetría satelital).

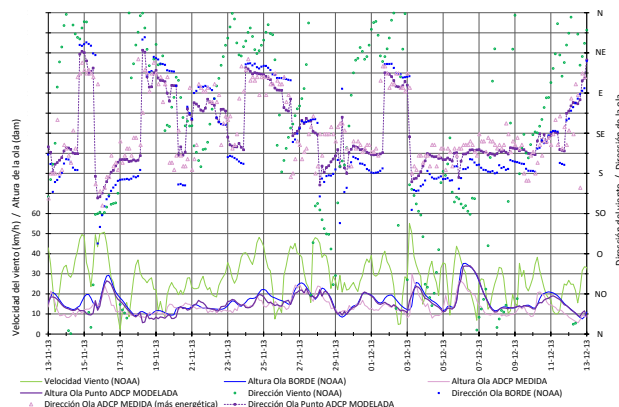


Figura 11: Resultados del modelo STWAVE comparados con las mediciones realizadas mediante ADCP (parte 1).

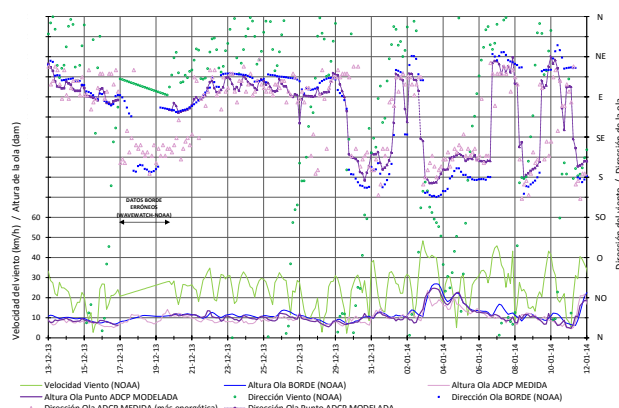


Figura 12: Resultados del modelo STWAVE comparados con las mediciones realizadas mediante ADCP (parte 2).

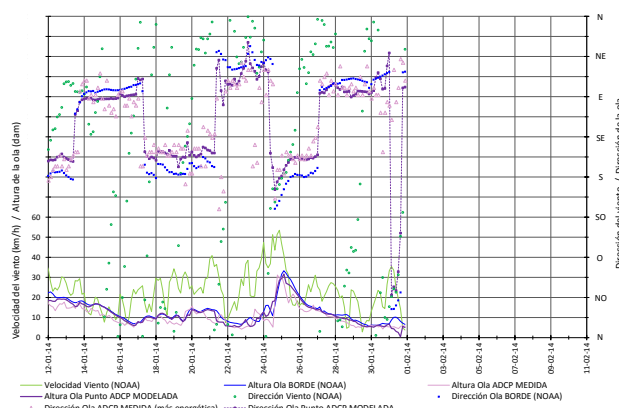


Figura 13: Resultados del modelo STWAVE comparados con las mediciones realizadas mediante ADCP (parte 3).

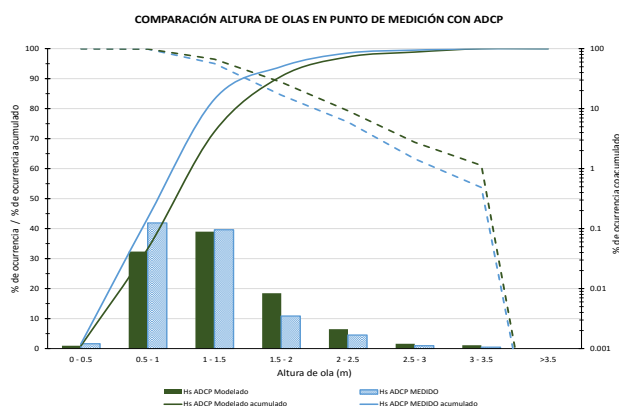


Figura 14: Comparación entre las alturas de olas en el punto de fondeo del ADCP calculadas con el modelo STWAVE y las mediciones realizadas.

2.4 Clima de olas resultante en el exterior del puerto frente al área portuaria

Con el objeto de calcular las posibles alturas de olas en los diferentes muelles a partir de los nueve años de información de oleaje disponible, se computó la transformación de las mismas utilizando como forzante del modelo de agitación portuaria, la serie de datos en el punto B1S mencionado anteriormente (ubicado frente a la boca del futuro puerto), extraídos de la modelación matemática de propagación y generación de olas realizada previamente con el modelo STWAVE.

A continuación se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en cuanto a parámetros que influyen en el diseño portuario.

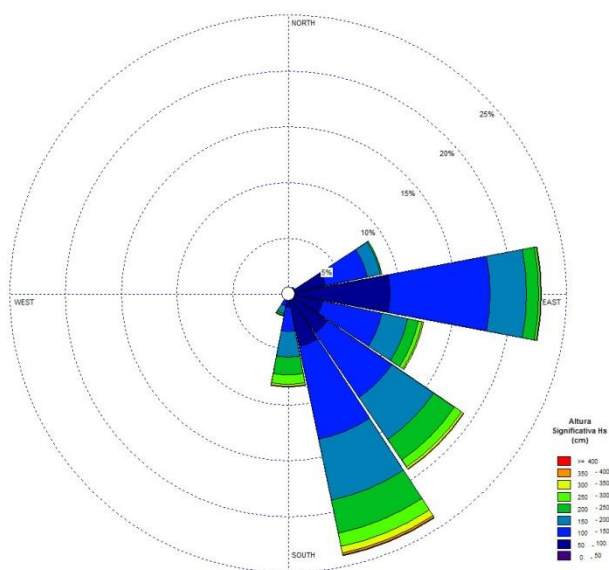


Figura 15: Distribución direccional de altura de olas en el Punto seleccionado, ubicado frente a la boca del nuevo puerto.

Puede observarse que las olas que arriban a la boca del futuro puerto, tienen períodos predominantemente entre 6 y 8 segundos, seguidas por olas con un período mayor, determinando que el intervalo más probable es el 6-12 segundos. Las olas de mayor altura tienden a tener períodos de pico entre 8 y 10 segundos.

La estadística direccional de olas muestra que las direcciones predominantes de donde provienen las olas son del ENE hasta el SSO.

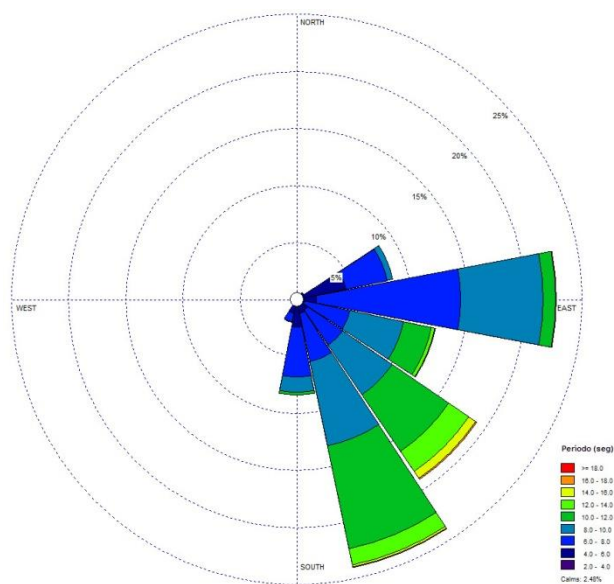


Figura 16: Distribución direccional del período pico de olas en el Punto seleccionado, ubicado frente a la boca del nuevo puerto.

A partir de estos resultados se definieron las direcciones y períodos de las olas que fueron transformadas mediante simulación numérica, a los puntos de interés dentro del interior portuario, abarcando períodos de 7 a 17 segundos y provenientes de todas las direcciones entre el ENE y el SSO (en la rosa de 16 direcciones). Olas con períodos menores a 7 segundos son de menor altura que el resto y por su menor entidad se asimilaron a 7 segundos dado que para modelarlas adecuadamente se debería generar una malla con un espaciamiento de nodos demasiado pequeño.

3 ESTUDIO DE AGITACIÓN PORTUARIA

A partir de los resultados presentados anteriormente en el punto B1S, se realizaron simulaciones de transformación de altura de ola mediante la utilización de un modelo de transformación de oleaje aplicable a la

estimación del campo de olas en puertos, regiones costeras abiertas, alrededor de islas y de estructuras fijas o flotantes, el cual simula el efecto combinado de refracción, difracción y reflexión, pudiendo considerar cuando corresponde efectos de disipación por fricción y rotura de la ola.

3.1 Descripción e implementación del modelo

El modelo BOUSS-2D₂₀₀₁ está basado en las ecuaciones y aproximación de Boussinesq deducidas por Nwogu (1993, 1996). Las ecuaciones correspondientes a la conservación de masa y momento, para propagación de olas no lineales en aguas bajas e intermedias, se encuentran integradas en profundidad. Estas ecuaciones pueden ser consideradas como una perturbación de las ecuaciones para aguas bajas, que son utilizadas frecuentemente en flujos de mareas en regiones costeras. Para olas de período bajo, las velocidades horizontales ya no son uniformes sobre las profundidades y la presión no es hidrostática. El perfil vertical del campo de flujo se calcula mediante la expansión de la velocidad potencial (ϕ) como una serie de Taylor sobre una elevación arbitraria (z_α) en la columna de agua. Para olas cuya longitud de onda, L , es mucho mayor que la profundidad de agua, h , la serie se corta a segundo orden, resultando una variación cuadrática de la velocidad potencial sobre la profundidad.

$$\Phi(x, z, t) = \phi_\alpha + \mu^2(z_\alpha - z)[\nabla\phi_\alpha \cdot \nabla h] + \frac{\mu^2}{2}[(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2]\nabla^2\phi_\alpha + O(\mu^4)$$

Donde $\Phi_\alpha = \Phi(x, y, t)$,

$$\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$$

$\mu = h/L$ es una medida de la dispersión de la frecuencia.

Las velocidades verticales y horizontales se obtienen a partir de la velocidad potencial de la siguiente manera:

$$u(x, z, t) = \nabla\Phi = u_\alpha + (z_\alpha - z)[\nabla(u_\alpha \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot u_\alpha)\nabla h] + \frac{1}{2}[(z_\alpha + h)^2 - (z + h)^2]\nabla(\nabla \cdot u_\alpha)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\partial\Phi}{\partial z} = -[u_\alpha \cdot \nabla h + (z + h)\nabla \cdot u_\alpha]$$

Donde $u_\alpha = \nabla\Phi|_{z_\alpha}$ es la velocidad horizontal en $z = z_\alpha$

Dado un perfil vertical para el campo de flujo, las ecuaciones de continuidad y de Euler (de momento) pueden ser integradas sobre la profundidad, reduciendo el problema de 3 a 2 dimensiones. Para olas débiles no lineales de altura H , mucho menor que la profundidad de agua h , las ecuaciones verticalmente integradas se escriben en términos de la altura de superficie libre de agua $\eta(x, t)$ y la velocidad $u_\alpha(x, t)$, de la siguiente forma (Nwogu 1993).

$$\eta_t + \nabla \cdot u_f = 0$$

$$u_{\alpha,t} + g\nabla\eta + (u_\alpha \cdot \nabla)u_\alpha + z_\alpha[\nabla(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot u_{\alpha,t})\nabla h] + \frac{1}{2}[(z_\alpha + h)^2 - h^2]\nabla(\nabla \cdot u_{\alpha,t}) = 0$$

Donde g es la gravedad

μ_f es la densidad de flujo

Las ecuaciones integradas en profundidad son capaces de describir la propagación y transformación de las olas irregulares multidireccionales sobre la profundidad de agua variable. El valor de la variable z_α es un parámetro libre que se elige de forma tal de minimizar las diferencias entre las características de dispersión del modelo y la relación de dispersión exacta para amplitudes de olas pequeñas. El valor óptimo es $z_\alpha = -0,535h$, cerca de la profundidad media.

Para calcular la rompiente de las olas en aguas poco profundas, donde la altura de ola es del orden de la profundidad del agua, ya no debe asumirse la aproximación no lineal hecha en las ecuaciones verticalmente integradas antes presentadas. Wei et. Al. 1995 derivaron una forma no lineal completa de las ecuaciones, a partir de la condición de borde dinámica de superficie libre, manteniendo todos los términos no lineales hasta el orden de los términos dispersivos. Nwogu 1996, derivó una forma más compacta de las ecuaciones al expresar algunos de los términos no lineales como una función de la velocidad en la superficie libre u_μ , en lugar de u_α . También se realizaron cambios adicionales a las ecuaciones para permitir la rotación débil de flujo en el plano horizontal y asegurar que z_α permanece en la columna de agua para las olas cercanas a la costa durante el proceso de runup de la ola. La forma

revisada de las ecuaciones no lineales completas se escriben de la siguiente manera:

$$\eta_t + \nabla \cdot u_f = 0$$

$$\begin{aligned} u_{\alpha,t} + g \nabla \eta + (u_{\eta} \cdot \nabla) u_{\eta} + w_{\eta} \nabla w_{\eta} + (z_{\alpha} - \eta) [\nabla (u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot u_{\alpha,t}) \nabla h] \\ + \frac{1}{2} [(z_{\alpha} + h)^2 - (h + \eta)^2] \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha,t}) \\ - [(u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (h + \eta) \nabla \cdot u_{\alpha,t}] \nabla \eta \\ + [\nabla (u_{\alpha,t} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot u_{\alpha,t}) \nabla h + (z_{\alpha} + h) \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha,t})] z_{\alpha,t} = 0 \end{aligned}$$

Donde z_{α} es ahora una función del tiempo, tal que $z_{\alpha} + h = 0,465 (h + \eta)$

El volumen de la densidad de flujo μ_f está dado por:

$$\begin{aligned} u_f = (h + \eta) \left\{ u_{\alpha} + \left[(z_{\alpha} + h) - \frac{(h + \eta)}{2} \right] [\nabla (u_{\alpha} \cdot \nabla h) + (\nabla \cdot u_{\alpha}) \nabla h] \right. \\ \left. + \left[\frac{(z_{\alpha} + h)^2}{2} - \frac{(h + \eta)^2}{6} \right] \nabla (\nabla \cdot u_{\alpha}) \right\} \end{aligned}$$

Las ecuaciones completas no lineales permiten calcular los efectos de la interacción corriente-ola. Las corrientes pueden ser introducidas a como condición de borde especificando explícitamente un campo de corrientes U .

IMPLEMENTACIÓN

La configuración portuaria simulada corresponde a una primera etapa de la realización del puerto y se presenta en la Figura 17.

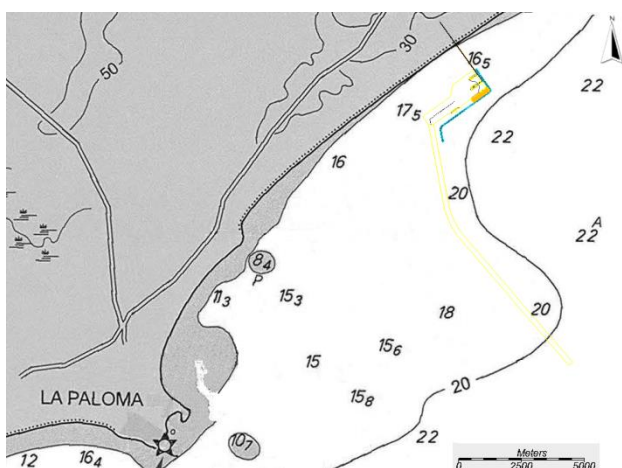


Figura 17: Configuración y ubicación de la primera etapa del puerto.

En la Figura 18 se muestra el dominio de cálculo mediante el modelo digital de terreno (las áreas coloreadas en marrón no pertenecen al dominio de cálculo), con la correspondiente

identificación de los muelles: G = Graneleros / M = Mineraleros / CG = Carga General / IN = Inflamables. Puede observarse que en la batimetría implementada ya se encuentran dragados a la profundidad de diseño, el canal de acceso y la dársena portuaria.

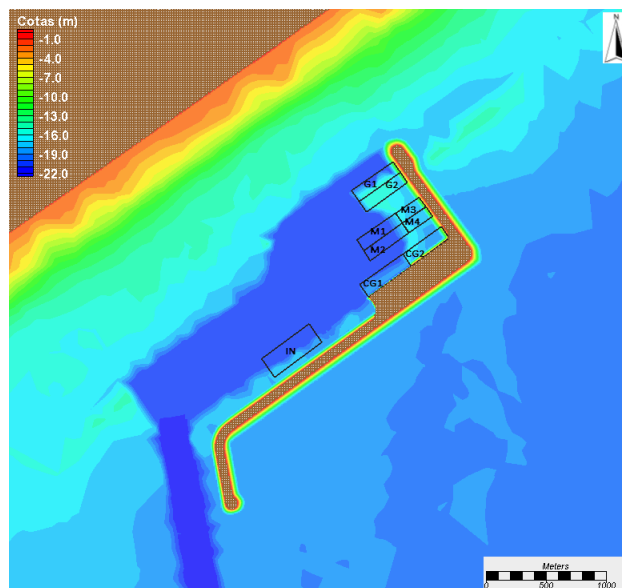


Figura 18: Modelo digital del terreno y dominio de cálculo, con la correspondiente identificación de las zonas de atraque de interés.

La profundidad de cálculo es la correspondiente al nivel medio del mar. El dominio de aplicación del modelo se extiende en un entorno semicircular de aproximadamente 4200 m de radio, con centro cercano al extremo oeste del rompeolas del puerto. La malla desarrollada contempla más de 465.000 elementos de cálculo que tienen una dimensión media de 8 m de lado, suficiente para simular ondas de 7 segundos de período en las profundidades presentes en la zona.

Los datos batimétricos utilizados para generar el modelo digital del terreno se basan en relevamientos de tipo monohaz de la zona de implantación del puerto y canal de acceso entregados por el Comitente.

Dado que el modelo calcula la reflexión de las olas, se especificaron también los coeficientes de reflexión correspondientes a las diversas estructuras y zonas costeras donde las olas pueden reflejarse, utilizando valores apropiados.

En la siguiente tabla se resumen las distintas combinaciones de período y dirección de olas que fueron simuladas para calcular la transformación de las alturas de olas.

DIR. N	Período de Pico Tp (seg.)					
	7	9	11	13	15	17
SSO	202.5	202.5	202.5	202.5	202.5	202.5
S	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0	180.0
SSE	157.5	157.5	157.5	157.5	157.5	157.5
SE	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0	135.0
ESE	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5	112.5
E	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0	90.0
ENE	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5	67.5

Tabla 1: Combinaciones de oleajes simuladas (ángulos en grados referidos al Norte).

De la Figura 19 a la Figura 21 se presentan algunos ejemplos de la transformación de olas de diferentes direcciones de incidencia y períodos, a los efectos ilustrativos.

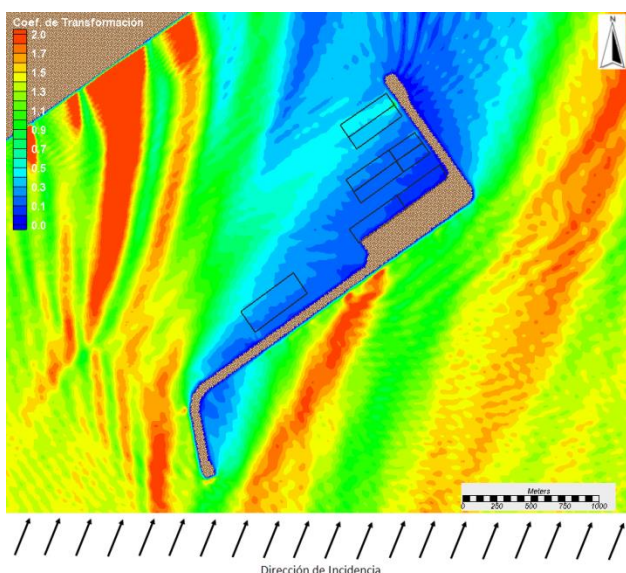


Figura 19: Coeficientes de transformación para olas provenientes del SSO y Tp 11 seg.

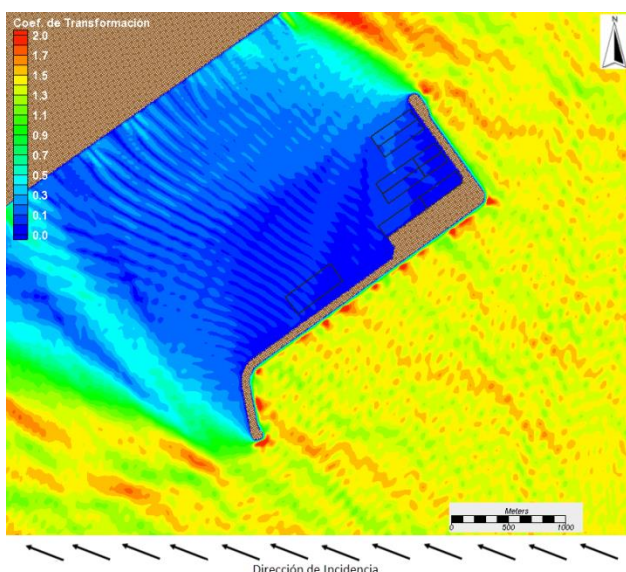


Figura 20: Coeficientes de transformación para olas provenientes del ESE y Tp 13 seg.

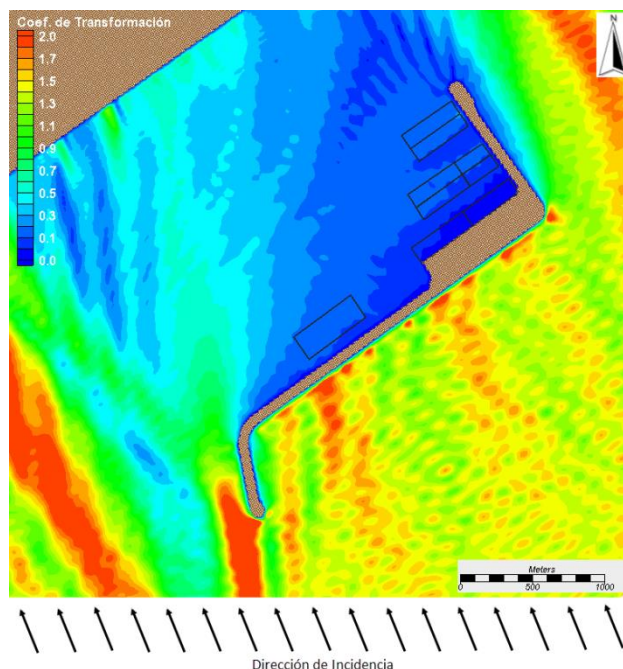


Figura 21: Coeficientes de transformación para olas provenientes del SSE y Tp 15 seg.

3.2 Resultados – Ajuste del Lay-Out

La modelación matemática fue empleada para seleccionar una configuración portuaria para la cual la duración de condiciones de oleaje en los sitios de atraque, superiores a los límites indicados a continuación, resulte significativamente inferior a la máxima admisible adoptada, igual a 200 horas anuales. Se ha estimado el número de horas anuales de superación de alturas de ola en los sitios de ataque cuyo código de identificación se ilustra en la tabla siguiente, de acuerdo a la nomenclatura definida en la Figura 17.

Se encuentra resaltado en amarillo la cantidad de horas por año que se superan los 0,8 m y 0,5 m de altura de ola para los Graneleros y Mineraleros, y para los buques de Carga General, respectivamente, según ha indicado el Plan Maestro (ACCIONA, Febrero 2013) citando como referencia la normativa ROM 3.1-99.

En la Figura 22 puede observarse que los sitios relativamente más expuestos al oleaje son el G1 (Graneles) ubicado muy cerca del extremo Norte del rompeolas, e IN (Inflamables), ubicado en cercanías de la boca portuaria.

No obstante, la duración de condiciones de oleaje superiores a los límites indicados, es muy inferior a la máxima admisible.

Id.	Graneleros			Mineraleros			Carga Gral.		Inflamables
h (m)	G1	G2	M1	M2	M3	M4	CG1	CG2	IN
>0	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760	8760
>0,1	7075	6684	5685	4616	3713	2992	3561	1947	4888
>0,2	3381	2323	1285	855	409	309	272	134	1551
>0,3	1160	572	146	76	21	14	18	2	505
>0,4	349	112	14	5	1	1	0	0	152
>0,5	90	25	1	1	1	0	0	0	41
>0,6	24	7	1	0	0	0	0	0	7
>0,7	8	1	0	0	0	0	0	0	1
>0,8	2	1	0	0	0	0	0	0	0
>0,9	1	0	0	0	0	0	0	0	0
>1	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2: Cantidad de horas que son superadas las alturas de olas en las zonas de interés.

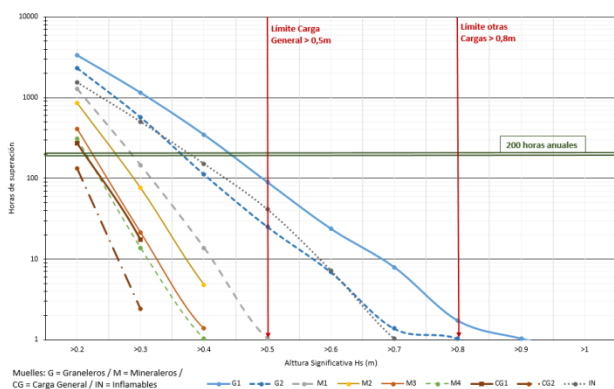


Figura 22: Horas anuales en que se superan las alturas de ola significativas indicadas.

4 CONCLUSIONES

El estudio del clima marítimo y la agitación mediante la modelación matemática permitió definir la orientación de la boca de acceso del puerto, la disposición de las obras de abrigo y de los sitios de atraque, a partir de garantizar condiciones de agitación adecuadas en los sitios de atraque.

REFERENCIAS

Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W., y Vincent, C. L. (1985). Similarity of the wind wave spectrum in finite depth waves; 1. Spectral form, J. Geophys. Res. 90(C1), 975-986.

IMFIA (Jun'2014). Asesoramiento sobre mediciones de oleaje, corrientes y niveles en la costa de Rocha. Primer informe de avance por tareas de asesoramiento realizadas para la Dirección Nacional de Hidrografía. Informe elaborado por: Dr. Ing. Francisco Pedocchi,

Mag. Ing. Rodrigo Mosquera, Bach. Fiorella Ghiardo.

Piedra-Cueva, Ismael (Sep'2013). Puerto Aguas Profundas, Informe Final: Estudios básicos marítimos.

Piedra-Cueva, Ismael (Dic'2013). Puerto Aguas Profundas, Informe Final: Estudio básico costero.

Thompson, E. R., Hadley, L. L., Brandon, W. A., McGehee, D. D., and Hubertz, J. M. (1996). Wave response of Kahului Harbor, Maui, Hawaii, Technical Report CERC-96-11, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

ROM 3.1-99. Proyecto de la configuración marítima de los puertos, canales de acceso y áreas de flotación.

Bouss-2D, 2001. "A Boussinesq Wave Model for Coastal Regions and Harbors". Report 1, Theoretical Background and User's Manual.

Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S. T., & Subramanya, R., 1995. "A fully nonlinear boussinesq model for surface waves, part 1, highly nonlinear unsteady waves". Journal of Fluid Mechanics 294, 71-92.

Nwogu, 1993. "Alternative form of Boussinesq Equations for nearshore from an array of wave probes". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 119(6), 618-638.

Nwogu, 1996. "Numerical prediction of breaking waves and currents with a Boussinesq model". Paper presented at the 25th International Conference on Coastal Engineering, ICCE '96, Orlando, FL.

MTOP, 2013. "Plan Maestro del Puerto de Aguas Profundas y Definición de la Configuración Portuaria. Etapa 2". Acciona Ingeniería para el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Uruguay.